

## PAN系炭素繊維強化複合材料の引張強度評価に関する研究

著者	渡邊 潤
号	60
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	工博第5189号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/00120520">http://hdl.handle.net/10097/00120520</a>

氏名	わた なべ じゅん
授与学位	渡 邊 潤
学位授与年月日	博士 (工学)
学位授与の根拠法規	平成28年3月25日
研究科, 専攻の名称	学位規則第4条第1項
学位論文題目	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 航空宇宙工学専攻
指導教員	PAN系炭素繊維強化複合材料の引張強度評価に関する研究
論文審査委員	指 導 教 員 東北大学教授 岡部 朋永
	主査 東北大学教授 岡部 朋永 東北大学教授 福永 久雄
	東北大学教授 橋田 俊之

## 論文内容要旨

炭素繊維強化プラスチック(CFRP)複合材料は、他素材と比較して比強度、比剛性に優れるため、これまでスポーツ、航空機、産業用途とその利用分野を拡大してきた。近年では、環境問題の世界的な高まりを受けて、今後の需要拡大が予想されている航空機においても燃費改善が大きく求められるとともに、その環境に与える影響や経済性にも大きな関心が集まっており、機体の軽量化に対して CFRP 複合材料の適用拡大が期待されている。今後、航空機の更なる軽量化に向けては、CFRP 物性においてより高い特性が要求されると考えられる。航空機用途では軽量化に直結すると考えられる CFRP の繊維軸方向の特性が重要であり、特に、基本的な特性である一方向 CFRP 複合材料の繊維方向引張強度の支配因子について理解することが必要である。そこで、本博士論文では、航空機用途における軽量化に直結する一方向 CFRP 複合材料の繊維方向引張強度を正確に予測するモデルを提案することで、CFRP 複合材料の更なる物性向上と繊維・樹脂・界面の設計指針を得ることを目的とした。

第2章では、一方向 CFRP 複合材料の繊維方向引張強度の支配因子の一つである炭素繊維の単繊維強度分布の同定を行った。炭素繊維の単繊維強度分布に関する研究は古くからなされ、最弱リンクモデルに基づくワイブル分布で整理されてきた。通常、炭素繊維の単繊維強度分布は単繊維引張試験により実験的に得られる。しかし、短試長領域の単繊維強度分布の実験値は、長試長領域による単繊維引張試験から外挿される値よりも低く、欠陥分布の影響や末端効果の影響が指摘されていた。そこで、本章ではこれまでの研究では明確にされてこなかった短試長領域の単繊維強度分布について厳密に議論するため、単繊維引張試験により長試長領域の単繊維強度分布を同定し、さらにマトリックス樹脂中に単繊維を埋め込んだ単繊維複合材料を用いた引張試験(フラグメンテーション試験)により短試長領域の単繊維強度分布を同定し、長試長領域から短試長領域まで説明可能な精密な単繊維強度分布を提案した。なお、フラグメンテーション試験の解析においては、マトリックス樹脂の弾塑性変形を考慮したシアラグモデルによりワイブルパラメータの算出を行った。得られた結論を以下に示す。

1. 単繊維引張試験と単繊維複合材料を用いたフラグメンテーション試験により炭素繊維の単繊維強度分布につ

いて評価を行ったところ、短試長領域を含めた単繊維強度分布には高強度領域の分布が狭い複合ワイブル分布 (Bimodal Weibull distribution) の適用が妥当であることを示した。物性の異なる 2 種類の PAN 系炭素繊維である T800S と T700S いずれにおいても複合ワイブル分布の適用が妥当であることが分かった。

2. 単繊維引張試験において、試長 5 mm よりも短い領域で単繊維引張試験を行う場合はクランプ領域で単繊維と接着剤の間で滑りが発生する現象であるクランプ効果の影響を考慮する必要があることを示した。

3. 炭素繊維の単繊維強度分布について、長試長領域のワイブル形状係数  $m_1$  が 4~5 であるのに対して、短試長領域のワイブル形状係数  $m_2$  は 12~13 であり、短試長領域の単繊維強度分布が狭いことが分かった。すなわち、長試長領域と短試長領域の単繊維強度分布で異なる 2 種類の強度支配因子が存在することが示唆された。

4. 走査型電子顕微鏡による炭素繊維単繊維の破断面観察において、単繊維の破断開始点のほぼ全てが繊維表面近傍に存在することを示した。すなわち、単繊維強度の複合ワイブル分布において、最弱リンク仮説は有効体積ではなく有効表面積に対して考える必要があることが示唆された。

5. 本章で同定した複合ワイブル分布を用いて単繊維強度分布の試長依存性について考察を行ったところ、短試長領域の単繊維強度は飽和傾向であることが分かった。PAN 系高強度炭素繊維である T800S では欠陥を減少させることで約 14 GPa まで単繊維強度を向上させることができることが示唆された。また、欠陥減少に加えて、炭素繊維の破壊靱性値向上によっても単繊維強度が向上できると推察される。これらの結果を考慮して一方向 CFRP 複合材料の繊維方向引張強度発現について理解する必要がある。

第 3 章では、一方向 CFRP 複合材料の繊維方向引張強度の予測を行った。一方向 CFRP 複合材料の繊維方向引張強度の予測についてはこれまでも数多く報告されている。破断繊維の荷重負担分を同一平面内に存在する全ての健全な繊維によって均等に分配されると仮定した Global Load Sharing (GLS) モデルや破断繊維の荷重負担分を同一平面内の破断繊維部近傍に位置する繊維ほど高いという局所的な応力集中による繊維破断集積部の形成を考慮した Local load sharing (LLS) モデルを用いた強度予測が提案されている。さらにこれらの理論を発展させ、マトリックス樹脂の微視的な損傷を考慮した 3 次元 Shear-lag モデルやマトリックス樹脂の構成則を考慮した 3 次元有限要素法解析と繊維破断部周辺の応力分布が一致するように容易に調整することが可能なばね要素モデルが提案されている。このように、一方向 CFRP 複合材料の引張強度予測は複合材料内部の応力分布を有限要素法解析により理論的に裏付けることで、精度良くかつ簡便に予測することが可能となっている。そこで本章では、一方向 CFRP 複合材料中の繊維を六角形配列された縦方向のばねとして、マトリックス樹脂をせん断剛性のみを有する横方向のばねとして扱うばね要素モデル (Spring Element Model) を用いて一方向 CFRP 複合材料の引張強度について解析を行い、実験との比較を行った。なお、本章ではマトリックス破壊の影響が小さいような炭素繊維/マトリックス樹脂系を用いて検討を行った。本解析モデルは、有限要素法解析により複合材料内部の応力分布を理論的に裏付けているため、有限要素法解析と同等の応力場を有するとともに繊維破断部近傍の応力解析を簡便に行える手法であるとともに、反復計算を必要とする繊維破断による無効長さ内の応力を直接与えるた

め、比較的スケールの大きい系での計算が可能である。炭素繊維の単繊維強度分布には第 2 章で得られた複合ワイブル分布と従来の単一ワイブル分布を用いて解析を行った。得られた結論を以下に示す。

1. 炭素繊維の単繊維強度分布に第 2 章で得た高強度領域の分布が狭い複合ワイブル分布を適用することで、単一ワイブル分布を適用した場合と比較して、一方向 CFRP 複合材料の引張強度を精度良く予測できることを示した。
2. 一方向 CFRP 複合材料のさらなる引張強度向上のためには、長試長領域の単繊維強度分布に加えて短試長領域の単繊維強度分布についても高める必要があることが示唆された。
3. 繊維配列(六角形、正方形、ランダム配列)が引張強度に及ぼす影響について解析を行った。本章で用いた計算条件においては、繊維配列が破断部近傍の周辺に存在する繊維の応力集中係数に与える影響は小さく、これに起因して引張強度に与える影響も小さいことを示した。

第 4 章では、実際の航空機用途に近いマトリックス破壊を伴う炭素繊維/マトリックス樹脂系を用いて一方向 CFRP 複合材料の繊維方向引張強度の予測を行った。すなわち、繊維破断部近傍においてマトリックスクラックを形成する系であり、マトリックスクラックによる隣接繊維への応力集中を考慮した一方向 CFRP 複合材料の繊維破断プロセスについて検討を行った。これまでに、破断繊維部近傍に位置する繊維への応力集中について理解するため、モデル的に単繊維を並行に配置したマルチファイバーコンポジットを用いてラマン分光法により応力集中を直接測定した研究も報告されているが、マトリックスクラックの発生により生じる応力集中に関する理解は十分ではなかった。そこで本章では、破断繊維近傍の隣接繊維表面への応力集中について議論するため、2 本の繊維を並行に配置したダブルファイバーフラグメンテーション試験を用いて応力集中係数について定量的に検討を行った。さらに、ダブルファイバーフラグメンテーション試験における繊維破断挙動から推定した破断繊維に隣接した繊維への応力集中係数をもとに一方向 CFRP 複合材料の繊維方向引張強度の予測を行い、実験結果との比較・考察を行った。得られた結論を以下に示す。

1. 繊維破断部近傍に隣接した繊維への応力集中係数を精密に議論するため、2 本の繊維を繊維径以下の距離で並行に配置したダブルファイバーフラグメンテーション試験を行ったところ、繊維破断部近傍の隣接した繊維の破断数増加を確認した。
2. 繊維破断部に隣接した繊維表面近傍の応力集中係数を導入したばね要素モデルを用いてダブルファイバーフラグメンテーション試験の繊維破断挙動解析を行ったところ、隣接繊維表面の応力集中係数 2.0 を用いることにより実験結果を再現することを示した。また、単繊維強度分布に高強度領域の分布が狭い複合ワイブル分布を導入することが、繊維破断部近傍の隣接繊維の大半が破断するというダブルファイバーフラグメンテーション試験の繊維破断挙動を再現する上で必要不可欠であることが分かった。
3. 繊維破断部近傍に隣接した繊維の応力集中係数が高まることに対して 3 次元有限要素法解析を行ったところ、マトリックスクラック先端近傍の樹脂は弾性的な特性を持つとする SSV モデルを導入し、メッシュサイズを 2 nm と非常に細かく設定することで、繊維破断部近傍の隣接繊維表面の局所的な領域において応力が高まる可能

性があることを示した。

4. 炭素繊維の単繊維強度分布に複合ワイブル分布を用いるとともに、繊維破断部近傍に隣接した繊維表面の応力集中係数 2.0 を導入したばね要素モデルにより一方向 CFRP 複合材料の引張強度予測を行ったところ、実験結果を精度良く再現できることを示した。

以上のように、本博士論文では、航空機用途における軽量化に直結する一方向 CFRP 複合材料の繊維方向引張強度の支配因子を理解することと正確な引張強度予測モデルを提案することで、CFRP 複合材料の更なる物性向上と繊維・樹脂・界面の設計指針を得ることを目的とした。その結果、炭素繊維の単繊維強度分布には高強度領域の分布が狭い複合ワイブル分布の適用が妥当であり、複合ワイブル分布を用いるとともに繊維破断部近傍のマトリックスクラックによる隣接繊維表面への局所的な応力集中を考慮することで、一方向 CFRP 複合材料の繊維方向引張強度を正確に予測できることを示した。本博士論文より、マトリックスクラック形成を抑制する樹脂開発と繊維表面への応力集中を軽減する繊維設計が一方向 CFRP 複合材料の引張強度向上に重要であることが示唆された。今後の材料設計の一助とする。

# 論文審査結果の要旨

需要の拡大が予想される航空機では環境に与える影響に大きな関心が集まっており、CFRP複合材料の適用拡大が期待されている。航空機では軽量化に直結するCFRP複合材料の繊維軸方向の特性が重要であり、基本的な特性である繊維方向引張強度の理解が必要である。本研究は、一方向CFRP複合材料の繊維方向引張強度を正確に予測するための実験および解析を行ったものである。本論文は、これらの研究成果をまとめたものであり、全編5章から構成されている。

第1章は序論であり、本研究の背景、目的および構成を述べている。

第2章では、一方向CFRP複合材料の引張強度の支配因子の一つである炭素繊維の単繊維強度分布の同定を行っている。過去の研究では明確にされなかった短試長領域を含む単繊維強度分布について詳細に議論するために、単繊維引張試験と単繊維複合材料を用いた引張試験により評価・解析を行い、単繊維強度分布には高強度領域の分布が狭い複合ワイブル分布の適用が妥当であることを明らかにしている。これは一方向CFRP複合材料の引張強度を正確に理解する上で重要な知見である。

第3章では、第2章で同定した単繊維強度分布を用いて一方向CFRP複合材料の引張強度予測を行っている。第2章で得られた複合ワイブル分布を適用することで、従来の単一ワイブル分布を適用した場合と比較して、引張強度を正確に予測できることを明らかにしている。引張強度を高めるためには、長試長領域の単繊維強度分布に加えて短試長領域の単繊維強度分布についても高める必要があることを示唆しており、CFRP複合材料物性の引張強度向上に関する重要な成果である。

第4章では、実際の航空機用途に近いCF/エポキシ樹脂の物性を有する系で評価・解析を行っている。2本の繊維を並行に配置したダブルファイバーフラグメンテーション試験を行い、隣接繊維表面の応力集中を明らかにしている。第2章で同定した単繊維強度分布と隣接繊維表面への応力集中を導入したばね要素モデルを用いることで、実験結果を精度良く再現できることを明らかにしている。これはマトリックスクラック形成を抑制する樹脂開発と繊維表面への応力集中を軽減する繊維設計が引張強度向上に重要であることを示唆しており、今後の材料設計に重要な成果である。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、一方向CFRP複合材料の繊維方向引張強度の正確な予測とさらなる物性向上に向けた材料開発に関して重要な成果を得たものであり、航空宇宙工学および機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。